

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Reifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingungsverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die normierte Amplitude ermittelt wird und die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden.

Ein solches Verfahren ist beispielsweise aus der US 6,450,020 B1 bekannt. Die DE 101 57 858 A1 offenbart ein Verfahren zum Bestimmen des Reifenluftdrucks aus dem Fahrzeugbetrieb bei niedrigen und hohen Geschwindigkeiten, das unabhängig von verschiedenen, an dem Fahrzeug angebrachten Elementen bereitgestellt wird. Dieses Verfahren basiert auf einer Resonanzfrequenz, die auf der Grundlage eines Radeschwindigkeitssignals extrahiert wurde, das über einen jedem Rad zugeordneten Geschwindigkeitssensor ausgegeben wurde. Die Bestimmung des Reifenluftdrucks basiert außerdem auf einem dynamischen Lastradius, der auf der Grundlage des Radeschwindigkeitssignals abgeleitet wurde.

Die Stärke und Frequenzlage der beim Abrollen entstehenden Reifenschwingungen sind stark abhängig vom Innendruck des Reifens, der sowohl die Steifigkeit als auch die Dämpfung des Rades bestimmt. Diese Eigenschaften bestimmen auch, mit

welcher Intensität und Frequenz die Felge zu Drehschwingungen angeregt wird. Die Drehschwingungen des Rades lassen sich beispielsweise mit einem ABS-Drehzahlsensor messen.

Am deutlichsten treten die Drehschwingungen bei den vom Innendruck abhängigen Resonanzfrequenzen auf.

Für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb eines Kraftfahrzeuges und zum Erreichen hoher Haltbarkeit müssen die Reifen mit einem vorgegebenen Luftdruck befüllt sein. Aufgrund von Diffusionsverlusten und Dichtungsverlusten im Reifen sinkt der Luftdruck stetig ab. Die entstehenden Leckageraten sind unvermeidlich und liegen typischerweise im Bereich einiger 100 mbar pro Jahr. Der Reifenluftdruck muss deshalb regelmäßig kontrolliert werden. Der durchschnittliche Kraftfahrer neigt jedoch dazu, dem Reifendruck keine oder zumindest nicht die angemessene Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Aus diesem Grund werden Kraftfahrzeuge zunehmend mit Reifendruckkontrollsystemen ausgerüstet, die den Luftdruck im Reifen kontinuierlich überwachen und eine Warnmeldung für den Fahrer abgeben, wenn der Reifendruck unter einen vorgegebenen Mindestdruck absinkt.

Es sind direkt messende Systeme bekannt, bei denen sich im Druckraum des Fahrzeugrades ein Sensor befindet, der den Druck misst. Das den ermittelten Reifeninnendruck auslesende Meßsystem wird in der Regel von einer Batterie versorgt und überträgt seine Messdaten über eine Funkstrecke. Nachteilig an diesem System ist neben der von der Batterielebensdauer abhängigen Funktionsfähigkeit auch die durch den Sensor und die Stromversorgung entstehende Unwucht an der Felge von bis zu 20 g.

Indirekt messende Systeme nutzen die sich einstellende Änderung im Abrollumfang eines Rades bei Luftdruckänderung im Reifen aus. Die Änderung des Abrollumfanges wird über die

ABS-Sensoren ermittelt, die alle Räder eines Fahrzeuges gleichzeitig detektieren und entsprechende Daten auswerten. Diese Systeme haben den grundsätzlichen Nachteil, dass ein nahezu identischer Druckverlust in allen Reifen, wie er sich durch die Leckageverluste zwingend einstellt, nicht erkennbar ist.

Die JP 5-133 831 offenbart eine Vorrichtung zum Bestimmen des Innendrucks eines Fahrzeugreifens. In dieser Vorrichtung wird die Resonanzfrequenz des Reifens durch eine Frequenzanalyse ermittelt, die in Bezug auf ein Geschwindigkeitssignal des Rades einschließlich der Schwingungsfrequenz des Reifens durchgeführt wird. Der aktuelle Druck wird aus der ermittelten Resonanzfrequenz bestimmt. Die zur Bestimmung des Luftdrucks verwendete Resonanzfrequenz bewegt sich im Bereich von 30 - 50 Hz. Dieser Bereich ist ausreichend, wenn das Fahrzeug sich im unteren oder mittleren Geschwindigkeitsbereich befindet. Nimmt die Fahrzeuggeschwindigkeit zu, ist das Schwingungsverhalten eines Reifens schwer zu bewerten. Im Ergebnis sinkt das Spektrum der Resonanzfrequenz ab und verschlechtert damit die Aussagekraft in Bezug auf den Reifeninnendruck.

In der JP 8-219 920 ist eine Vorrichtung beschrieben, mit der mehrere Resonanzfrequenzen aus mehreren Frequenzbereichen, beispielsweise einem Bereich von 30 - 50 Hz und einem Bereich von 60 - 90 Hz ermittelt werden.

Dem Verfahren nach der US 6,385,553 liegt die Erkenntnis zugrunde, dass das Radgeschwindigkeitssignal eines angetriebenen Rades eine Resonanzfrequenz höherer Ordnung enthält, die sich auch dann sehr stark mit der Veränderung des Reifeninnendruckes ändert, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit hoch ist. In dieser Druckschrift wird sehr ausführlich beschrieben, wie das Frequenzspektrum ermittelt und die interessierende Resonanzfrequenz mathematisch beispielsweise durch ei-

ne Fouriertransformation (FFT) ermittelt wird, so dass eine normierte Amplitude über der Frequenz aufgetragen werden kann.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Verfahren anzugeben, mit denen die beispielsweise nach der US 6,385,553 ermittelte Resonanzfrequenz ausgewertet werden kann, um zu erkennen, ob der Reifeninnendruck eines beliebigen Rades des Fahrzeuges unter einen vorgegebenen Wert absinkt, um dem Fahrer ein entsprechendes Warnsignal zu geben.

Ein erstes Auswerteverfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln und Speichern der Gradienten $\alpha_{1\text{soll}}$, $\alpha_{2\text{soll}}$ der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
- c) Bilden des Verhältnisses α_{soll} aus den Gradienten $\alpha_{1\text{soll}}$ und $\alpha_{2\text{soll}}$,
- d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- e) kontinuierliches Ermitteln der Gradienten $\alpha_{1\text{ist}}$, $\alpha_{2\text{ist}}$ der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
- f) Bilden des Verhältnisses α_{ist} aus den Gradienten $\alpha_{1\text{ist}}$ und $\alpha_{2\text{ist}}$,
- g) kontinuierliches Vergleichen der Verhältnisse α_{ist} und α_{soll} miteinander,

- h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von α_{ist} zu α_{soll} einen definierten Wert überschreitet.

Bei der Auswertung der Schwingungscharakteristik wird das Verhältnis der Steigungen links und rechts des Maximums bestimmt. Der Frequenzbereich liegt vorzugsweise zwischen 20 - 60 Hz und 70 - 110 Hz. Das Verhältnis der Steigungen liegt im Bereich von -0,25 bis -4.

Ein weiteres erfindungsgemäßes Verfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln der xdB-, insbesondere 3 dB-Grenzfrequenz f_{G1soll} , f_{G2soll} der Maxima,
- c) Bilden und Speichern der Differenzfrequenz Δf_{Gsoll} aus der oberen xdB-Grenzfrequenz f_{G2soll} und der unteren xdB-Grenzfrequenz f_{G1soll} ,
- d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- e) kontinuierliches Ermitteln der xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen f_{G1ist} , f_{G2ist} der Maxima im Fahrbetrieb,
- f) Bilden der Differenzfrequenz Δf_{G1ist} aus der oberen xdB-Grenzfrequenz f_{G2ist} und der unteren xdB-Grenzfrequenz f_{G1ist} ,
- g) kontinuierliches Vergleichen der Differenzfrequenzen Δf_{Gsoll} und Δf_{G1ist} miteinander,

- h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von Δf_{G1st} zu Δf_{Gsol1} einen definierten Wert überschreitet.

Dieses Verfahren nutzt das Phänomen aus, dass die xdB-Grenzfrequenzen der Maxima mit steigendem Luftdruck in Richtung höherer Frequenzen wandern. Aus der Abhängigkeit kann dann der aktuelle Luftdruck des Reifens bestimmt werden. Auch dieses Verfahren kann für jedes Rad einzeln durchgeführt werden, wobei eine Korrelation der Räder untereinander nicht erforderlich ist.

Ein drittes erfindungsgemäßes Auswerteverfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermittlung und Aufzeichnung der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln und Speichern des maximalen Amplitudenwertes a_{sol1} bei Soll-Druck des Reifens,
- c) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- d) kontinuierliches Ermitteln des maximalen Amplitudenwertes a_{1st} ,
- e) kontinuierliches Vergleichen der maximalen Amplitudenwerte a_{sol1} und a_{1st} miteinander,
- f) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von a_{1st} zu a_{sol1} einen definierten Wert überschreitet.

Auch bei diesem Verfahren wird die normierte Amplitude zur Bestimmung des Luftdrucks verwendet.

Ein viertes gattungsgemäßes Verfahren zeichnet sich durch folgende erfindungsgemäße Schritte aus:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen des Frequenzspektrums des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz,
- b) Transformieren der das Schwingungsverhalten des Rades beschreibenden Differentialgleichungen

$$J_F \ddot{\phi} = (\phi - \varphi) c_s + (\dot{\phi} - \dot{\varphi}) d_s$$

$$J_R \ddot{\phi} = -(\phi - \varphi) c_s - (\dot{\phi} - \dot{\varphi}) d_s + F_t r$$

mittels Laplace- oder Fouriertransformation,

- c) Auswählen eines Bereichs Δf_{soll} um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz f_{soll} herum,
- d) Korrelieren des ausgewählten Bereichs Δf_{soll} mit den transformierten Differentialgleichungen,
- e) Berechnen der Rotationssteifigkeit $c_{s,soll}$ und der Rotationsdämpfung $d_{s,soll}$,
- f) kontinuierliches Ermitteln des Frequenzspektrums des Rades im Fahrbetrieb und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz f_{1st} ,
- g) Auswählen eines Bereichs Δf_{1st} um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz f_{1st} herum,
- h) Korrelieren des ausgewählten Bereichs Δf_{1st} der ermittelten Resonanzfrequenz f_{1st} mit den transformierten Differentialgleichungen zur Bestimmung der Rotationssteifigkeit $c_{s,1st}$ und der Rotationsdämpfung $d_{s,1st}$,

- i) Bilden der Differenz von $c_{s,soll}$ und $c_{s,ist}$ und der Differenz von $d_{s,soll}$ und $d_{s,ist}$ und Erzeugen eines Signals, wenn mindestens eine der Differenzen einen definierten Wert überschreitet.

Zur Anwendung des dem Verfahren vier zugrundeliegenden Modells müssen vorab geeignete Werte für die Trägheitsmomente von Reifen J_F und Felge J_R sowie für den Reifenradius r festgelegt werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen und Felgen repräsentieren.

In Ergänzung zu Verfahren vier kann in einem fünften gattungsgemäßen Verfahren auch der Reifendruck direkt aus Kennfeldern $p(c_s, d_s)$ bestimmt werden. Es zeichnet sich durch folgende über Verfahren vier hinausgehende erfindungsgemäße Schritte aus:

- a) Ermitteln des Reifeninnendrucks $p_{soll}(c_{s,soll}, d_{s,soll})$ im Sollzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
- b) Ermitteln des Reifeninnendrucks $p_{ist}(c_{s,ist}, d_{s,ist})$ im Istzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen.
- c) Bilden der Differenz von p_{soll} und p_{ist} und Erzeugen eines Signals, wenn die Differenz einen definierten Wert überschreitet.

Mit diesen Verfahren (4 und 5) werden aus den Signalen der Raddrehzahlgeber Informationen herausgefiltert, die in dem

System Reifen-Radaufhängung generiert werden. Die Informationen, die ausgewertet werden, beziehen sich auf die Rotationsschwingung des Reifens. Vorzugsweise wird der Bereich von 20 - 60 Hz aus der Resonanzfrequenz ausgewählt.

Statt der Erzeugung eines Warnsignals ist es nach Verfahren 5 auch möglich, den Reifenluftdruck zu berechnen und anzuzeigen. Dabei wird aus der Felgengeschwindigkeit die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung ermittelt und über die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung der Luftdruck innerhalb des Luftreifens berechnet. Dadurch ist es möglich, Sensoren zur Ermittlung der Radvertikalbewegung einzusparen und den Luftdruck innerhalb des Luftreifens allein anhand der Reifen- bzw. Felgendrehbewegung zu ermitteln. Die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung ist druckabhängig, so dass der Luftdruck innerhalb des Luftreifens durch Bestimmung der Eigenfrequenz berechnet werden kann.

Vorteilhafterweise erfolgt die Berechnung des Reifenluftdruckes über einen Vergleich der ermittelten Eigenfrequenz mit vorab aufgenommenen Vergleichswerten. Diese Vergleichswerte der Eigenfrequenz wurden bei verschiedenen Felgengeschwindigkeiten bzw. Fahrgeschwindigkeiten gemessen und in einem Speicher abgelegt. Somit ergibt sich über ein Geschwindigkeitsfeld ein Verlauf von Eigenfrequenzen, der einem korrespondierenden Reifenluftdruck zugeordnet werden kann. Stimmt die berechnete Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung nicht mit dem Vergleichswert überein, liegt eine Abweichung des Luftdruckes vor, die qualitativ und quantitativ berechnet werden kann.

Die Felgengeschwindigkeit wird zweckmäßigerweise über einen bereits vorhandenen ABS-Sensor aufgenommen, so dass kein zusätzlicher Sensor und kein zusätzlicher baulicher Aufwand betrieben werden muss, um die Eingangsgröße zu erhalten. Die

Berechnung selbst wird in einer Auswerteeinheit, insbesondere einem Rechner ausgeführt.

Die Berechnung des Reifenluftdruckes erfolgt vorteilhafterweise unter Berücksichtigung der Betriebsparameter des Reifens, insbesondere der Reifentemperatur, da diese Einfluss auf die Eigenfrequenz der Drehschwingung hat, da sich über die Reifentemperatur die Steifigkeit und die Dämpfung des Luftreifens verändern, was wiederum Parameter sind, deren Veränderung die Eigenfrequenz beeinflussen.

Um die Eigenfrequenz der Felgendrehschwingung berechnen zu können, wird ein Reifenmodell verwendet, das vorab ermittelte Reifenparameter berücksichtigt, insbesondere werden die Rotationssteifigkeit und die Rotationsdämpfung des Reifens sowie das Trägheitsmoment des Reifens und der Felge als feststehende Größen des Reifens bzw. der Felge eingegeben. Bei einem Reifen- bzw. Felgenwechsel müssen entsprechend veränderte Parameter oder Kennwerte eingegeben und neue Vergleichswerte ermittelt werden. Das System muss bei einem Reifen- bzw. Felgenwechsel für Reifen anderer Dimension oder Bauart mit neuen Reifenparametern neu kalibriert werden.

Bei allen fünf Verfahren wird das Signal vorzugsweise erst erzeugt, wenn die Abweichung den definierten Wert über einen festgelegten Zeitraum, beispielsweise eine Minute, unterschreitet.

Die Gradienten α_{1soll} und α_{2soll} unterhalb und oberhalb der Resonanz bei Soll-Druck werden vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Vorzugsweise werden auch die xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen f_{G1soll} , f_{G2soll} der Maxima für einen speziellen

Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Auch die maximalen Amplitudenwerte a_{soll} bei Soll-Druck werden vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Die erste Korrelation der transformierten Differentialgleichungen mit der transformierten Eigenfrequenzkurve zur Ermittlung des Reifeninnendrucks p_{soll} bzw. der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s wird vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Das Speichermedium kann ein Transponder oder ein Barcode sein. Die Verwendung eines Speichermediums hat den Vorteil, dass die reifentypischen Charakteristika vom Reifenhersteller ermittelt werden können und bei einem Radwechsel etwa veränderte Daten einfach dem Fahrzeug zugeordnet werden können.

Über die Lage der maximalen Amplitudenwerte kann die Reifendimension erkannt werden. Dabei wird die Erkenntnis ausgenutzt, dass die Seitenwand eines Reifens für große Felgendurchmesser in der Regel niedriger ist als für Reifen mit kleinen Durchmessern. Je niedriger die Seitenwand ist, um so höher ist die Eigenfrequenz.

Vorzugsweise wird mit Hilfe eines Initialisierungsmittels am fahrenden Kraftfahrzeug eine von der Kraftfahrzeuggeschwindigkeit abhängige Kalibrierung durchgeführt.

Zur Ermittlung der normierten Amplitude erfolgt die Umrechnung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich vorzugsweise über Tabellen.

Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, dass vor den beschriebenen Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens zuerst systematische und stochastische Störungen aus dem Frequenzspektrum eliminiert werden sollten, damit diese Störungen nicht zu falschen Ergebnissen hinsichtlich eines Reifendruckverlusts führen.

Vorteilhafterweise können auch zwei oder mehr der beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren miteinander kombiniert werden. Auch die Verwendung von einem oder mehreren erfindungsgemäßen Verfahren in einem direkt und/oder indirekt messenden Reifendrucküberwachungssystem ist im Hinblick auf die hierdurch erreichte erhöhte Sicherheit bzw. Redundanz vorteilhaft.

Bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb können durch die Last, die Temperatur, die Feuchtigkeit, den Umgebungsluftdruck und/oder die Fahrzeugbeschleunigung hervorgerufene Fremdeinflüsse kompensiert werden. Hierzu müssen natürlich entsprechende Sensoren vorgesehen sein.

Wenn entsprechende Sensoren vorgesehen sind, kann bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb auch die Profiltiefe, deren Veränderung durch den Verschleiß eine Veränderung der Resonanzfrequenz bewirkt, berücksichtigt werden.

Die vorstehend beschriebenen Verfahren können mit einem indirekten System zur Erkennung des Minderluftdrucks gekoppelt werden.

Die nachfolgenden Zeichnungen verdeutlichen die unterschiedlichen Auswerteverfahren.

Es zeigt:

- Figur 1 die Prinzipdarstellung der normierten Amplitude (logarithmisch aufgetragen) über der Frequenz;
- Figur 2 Die Prinzipdarstellung der sich mit sinkendem Luftdruck verändernden Gradienten α ;
- Figur 3 eine Darstellung der 3dB-Grenzfrequenzen an unterschiedlichen Maxima der Amplitude;
- Figur 4 die Prinzipdarstellung des steigenden Amplitudenmaximums bei sinkendem Reifeninnendruck;
- Figur 5 die prinzipielle Abhängigkeit der normierten Amplitude vom Reifenluftdruck;
- Figur 6 das Modell zur Beschreibung der Radschwingungen;
- Figur 7 die überlagerten Frequenzkurven nach dem Modell und den Werten aus den Raddrehzahlgebern;
- Figuren 8 bis 10 - Frequenzverläufe.

Das Eigenschwingverhalten eines Reifens kann aus den Signalen der Rad-Drehzahlgeber, wie sie in Antiblockiersystemen verwendet werden, ermittelt werden. Hier zeigt die Darstellung nach Figur 1 die Abhängigkeit der logarithmisch aufgetragenen normierten Amplitude über der Frequenz. Die Ermittlung dieser Kurve ist in der US 6,385,553 oder in der DE 101 57 885 sehr ausführlich erläutert, so dass hierzu keine weiteren Ausführungen gemacht werden.

Mit fallendem Reifeninnendruck bewirken die vom Druck abhängigen Größen Dämpfung und Steifigkeit des Reifens eine relative Verstärkung der Anregung der Felge bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz und eine Verminderung bei Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz. Die Gradienten α der

Verstärkung unter- und oberhalb der Resonanz lassen sich nach Auswertung der Raddrehzahlssignale (beispielsweise über Fouriertransformationen über ganzzahlige Anzahlen von Umdrehungen bei annähernd gleicher Geschwindigkeit) ermitteln und über einen Vergleich mit dem zuvor kalibrierten Soll-Zustand des Reifens bei Soll-Innendruck als Maß für einen möglichen Minderluftdruck verwenden. Die Gradienten α_{ist} und α_{soll} werden zueinander ins Verhältnis gesetzt. Liegt dieser Wert über einen definierten Zeitraum außerhalb gesetzter Toleranzwerte, erfolgt eine Warnung vor zu niedrigem Reifendruck.

Bei der Ermittlung der Resonanzfrequenz muss ein repräsentatives Amplitudenspektrum verwendet werden. Hierzu sind stationäre Fahrbedingungen festzustellen. Auch muss eine adäquate Auflösung der Frequenz sichergestellt sein. Eine hohe Anzahl von Mittlungen der ermittelten Werte geben eine gute Schätzung des Luftdrucks, berücksichtigen die Gewichtung von Straßenverhältnissen (schlecht Oberfläche, ebene Oberfläche) und lassen eine Normierung der Schwingungsidentität zu.

Figur 3 zeigt die 3dB-Grenzfrequenzen, die vom Amplitudenmaximum aus ermittelt werden. Aus der Differenz der oberen Grenzfrequenz f_{G2} und der unteren Grenzfrequenz f_{G1} wird die Differenzfrequenz Δf_G ermittelt. Bei sinkendem Luftdruck verkleinert sich die Differenzfrequenz, da die normierte Amplitude steigt, was zu einer Stauchung der Frequenzkurve führt (vgl. Figur 2). Je kleiner die Differenzfrequenz wird, um so niedriger ist der Luftdruck. Sinkt die Differenzfrequenz unter einen vorgegebenen Wert für eine definierte Zeitspanne, wird ein Signal erzeugt, das den Minderluftdruck anzeigt.

Figur 4 ist entnehmbar, dass sich die Amplitude in Richtung niedriger Frequenzen verlagert, wenn der Reifeninnendruck sinkt. Gleichzeitig erhöht sich der Maximalwert der Amplitude. Das Maximum wird ermittelt und mit dem Soll-Wert ver-

gleichen. Steigt der aktuell ermittelte Maximalwert über einen vorgegebenen Wert, wird das den Minderdruck anzeigende Signal erzeugt.

Die Lage der Grenzfrequenzen f_{G1} , f_{G2} , die Größe der Gradienten α_{soll} , α_{ist} und der Wert der maximalen Amplituden a_{soll} , a_{ist} , ist neben dem Luftdruck von einer Vielzahl weiterer Parameter, wie beispielsweise dem Reifentyp und dem Abriebzustand abhängig. Das mit den vorgeschlagenen Verfahren arbeitende Reifendruckkontrollsystem muss deshalb kalibriert werden. Dabei wird ein Satz von Kalibrierungsparametern aufgenommen. Zum Auslösen der Initialisierung ist ein Initialisierungsmittel zu betätigen. Damit wird dem System dann mitgeteilt, dass alle Reifen korrekt befüllt sind. Vorzugsweise werden für unterschiedliche Geschwindigkeits- und Radmomentenbereiche eigene Kalibrierungsdatensätze aufgenommen. Immer wenn nach dem Betätigen des Initialisierungsmittels ein Geschwindigkeitsbereich das erste Mal gefahren wird, wird für diesen Bereich der Satz der Kalibrierparameter ermittelt.

Fremdeinflüsse, die die Lage der vorstehenden Werte beeinflussen, können kompensiert werden, wenn im Fahrzeug geeignete Messwerte zur Verfügung stehen. Diese können durch entsprechende Sensoren bestimmt werden. Aus dem Niveau-regulierungssystem kann die Radlast bestimmt werden. Durch den Außentemperatursensor, gegebenenfalls in Verbindung mit einem Temperaturmodell für Reifen, kann die Temperatur berücksichtigt werden. Beschleunigungen und Verzögerungen des Fahrzeugs können über die ABS-Sensoren oder den Bremslichtschalter ermittelt werden. Aus der Motorsteuerung kann der Umgebungsluftdruck berücksichtigt werden. Die Profiltiefe kann durch Ermittlung des Abrollumfangs (zurückgelegte Wegstrecke/Raddrehzahl) ermittelt werden.

Figur 6 zeigt das Modell zur Ermittlung der Reifenschwingungen. Das Rad besteht aus der Felge 1 mit der Trägheit J_F und dem Gürtel 2 mit der Trägheit J_R . Das Rad ist über die Radaufhängung mit der Federung 4 und der Dämpfung 5 mit dem Aufbau 3 verbunden. Die Dämpfung der Drehschwingungen des Rades erfolgt über die Rotationsfeder-Dämpfereinheit 6, mit der Federkonstanten c_s und der Dämpferkonstanten d_s . Die Aufbaufeder 4 weist die Federkonstante c_a und der Aufbaudämpfer 5 die Dämpferkonstante d_a auf. Der Gürtel 1 wird mit der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ und die Felge 1 mit der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\Phi}$ bewegt. Die Anregung zur Schwingung erhält das Rad über die Straße mit der Kraft F_t .

Betrachtet man nur das Rad allein und vernachlässigt die Ankopplung des Rades an den Aufbau 3 über Federung 4 und Dämpfung 5, so lässt sich die Rotation von Reifen 1 und Felge 2 nach diesem Modell durch folgende Differentialgleichungen beschreiben:

$$J_F \cdot \ddot{\Phi} = (\Phi - \phi) \cdot c_s + \left(\dot{\Phi} - \dot{\phi} \right) \cdot d_s$$

$$J_R \cdot \ddot{\phi} = -(\Phi - \phi) \cdot c_s - \left(\dot{\Phi} - \dot{\phi} \right) \cdot d_s + F_t \cdot R$$

Die Rotationssteifigkeit c_s und die Rotationsdämpfung d_s sind unter anderem sowohl vom Luftdruck p , dem Radaufhängungstyp als auch der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Der dynamische Abrollradius r wird in diesem Ansatz durch einen konstanten Reifenradius R ersetzt.

Das obige Differentialgleichungssystem kann vorteilhaft und schnell mit einer Laplace-Transformation im Frequenzbereich gelöst werden. Zunächst wird das Differentialgleichungssystem in ein System erster Ordnung umgeschrieben:

$$y_1 = \varphi \quad \dot{\gamma}_1 = \dot{\varphi}$$

$$\gamma_2 = \dot{\gamma}_1 \quad \dot{\gamma}_2 = \ddot{\varphi} = (\dot{\Phi} - \dot{\varphi}) \frac{c_s}{J_F} + \left(\ddot{\Phi} - \ddot{\varphi} \right) \frac{d_s}{J_F}$$

$$\gamma_3 = \Phi \quad \dot{\gamma}_3 = \dot{\Phi}$$

$$\gamma_4 = \dot{\gamma}_3 \quad \dot{\gamma}_4 = \ddot{\Phi} = -(\dot{\Phi} - \dot{\varphi}) \frac{c_s}{J_R} - \left(\ddot{\Phi} - \ddot{\varphi} \right) \frac{d_s}{J_R} + \frac{F_t \cdot R}{J_R}$$

Umgeschrieben ergibt dieses das folgende Differentialgleichungssystem:

$$\dot{\gamma}_1 = \gamma_2$$

$$\dot{\gamma}_2 = (\gamma_3 - \gamma_1) \frac{c_s}{J_F} + (\gamma_4 - \gamma_2) \frac{d_s}{J_F}$$

$$\dot{\gamma}_3 = \gamma_4$$

$$\dot{\gamma}_4 = -(\gamma_3 - \gamma_1) \frac{c_s}{J_R} - (\gamma_4 - \gamma_2) \frac{d_s}{J_R} + \frac{F_t \cdot R}{J_R}$$

Dieses Differentialgleichungssystem wird nun einer Laplace-Transformation unterworfen. Dabei gilt:

$$\dot{\gamma}_i = s \cdot \gamma_i \quad i=1,\dots,4$$

mit der komplexen Variablen s .

Dadurch erhält man aus dem linearen Differentialgleichungssystem ein lineares Gleichungssystem:

$$A * \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F_R R}{J_R} \end{bmatrix}$$

mit

$$A = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_s}{J_F} & -\frac{d_s}{J_F} - s & \frac{c_s}{J_F} & \frac{d_s}{J_F} \\ 0 & 0 & s & -1 \\ -\frac{c_s}{J_R} & -\frac{d_s}{J_R} & \frac{c_s}{J_R} & s + \frac{d_s}{J_R} \end{bmatrix}.$$

Sei

$$A^* = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c_s}{J_F} & 0 & \frac{c_s}{J_F} & \frac{d_s}{J_F} \\ 0 & 0 & s & -1 \\ -\frac{c_s}{J_R} & \frac{R}{J_R} & \frac{c_s}{J_R} & s + \frac{d_s}{J_R} \end{bmatrix}$$

setzt man nun

$$s = i\omega$$

($i^2 = -1$, ω = Kreisfrequenz)

und berücksichtigt man, dass

$$\gamma_2 = \dot{\varphi}$$

ist, so erhält man direkt den Frequenzgang, ohne F_t angeben zu müssen:

$$G_{F_t}^{\dot{\varphi}} = \frac{\det(A^*) \cdot F_t}{\det(A) \cdot F_t} = \frac{\det(A^*)}{\det(A)}$$

Durch das Reifenmodell ist es möglich, ohne aufwendige Messungen schnell und genau die Eigenfrequenz bestimmen zu können. Das ABS-Signal liefert das Frequenzspektrum der Felgenschwingung wie es gemessen wurde. Ein Beispiel eines gemessenen Frequenzspektrums 10 ist in der Figur 8a dargestellt. Ein zweites Frequenzspektrum 20 gemäß Figur 8b erhält man, indem ein Dirac-Impuls oder eine tangentielle Anregung F_t auf das Modell angewendet wird, anhand dessen das Frequenzspektrum 20 des Modells in Abhängigkeit von den Modellparametern berechnet wird.

Durch die Variation der Parameter hinsichtlich der Rotationssteifigkeit c_s und Rotationsdämpfung d_s kann das Modell auf das gemessene Spektrum für eine bestimmte Geschwindigkeit und einen bestimmten Luftdruck des Reifens, z. B. durch Finden des Minimums der Summe der Fehlerquadrate zwischen Modell und gemessenen Spektrum, kalibriert werden, was in der Figur 9 dargestellt ist.

Über festgelegte Parameter c_s für die Rotationssteifigkeit des Reifens und d_s für die Rotationsdämpfung des Reifens wird der Reifen identifiziert und das Reifenmodell kann dazu benutzt werden, um den tatsächlichen Reifenluftdruck zu bestimmen. Dies erfolgt, indem das gemessene Frequenzspektrum durch Variationen des Luftdruckes innerhalb des Modells

an das Modellfrequenzspektrum angepasst wird. Ein angepasster Frequenzverlauf ist in der Figur 10 dargestellt. Sobald eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Frequenzspektrum 10 und dem Modellfrequenzspektrum 20 erreicht ist, ist der tatsächlich vorhandene Reifenluftdruck bestimmt und kann über ein Display ausgegeben werden. Alternativ kann bei Unterschreiten oder Überschreiten eines Grenzwertes eine Warnmeldung ausgegeben werden.

Alternativ zur expliziten Lösung des obigen Differentialgleichungssystems per Laplace-Transformation können empirische Lösungsfunktionen eingesetzt werden, die anpassbare Parameter enthalten. Zum Beispiel kann ein typisches Spektrum für das jeweilige Fahrzeug durch folgende Modellgleichung für die Amplitude

$$P = (ac_s + bd_s + e)^n$$

beschrieben werden, wobei die Konstanten a, b, e und n an das Fahrzeug angepasst werden müssen und n zwischen 0,3 und 0,9 liegen muss. Das Ergebnis dieser Bestimmung ist Figur 7 entnehmbar.

Die durchgezogene Linie zeigt das normierte Amplitudenspektrum des Raddrehzahlgeber, die Strich-Punkt-Linie das Ergebnis des Modells. Der Reifenluftdruck p wird aus den ermittelten Werten von Steifigkeit und Dämpfung c_s , d_s durch Anpassung der gerechneten Modellkurven an gemessenen Kurven als Funktion $p=f(c_s, d_s)$ bestimmt.

Die Eliminierung von systematischen und stochastischen Störungen in dem Frequenzspektrum im Vorfeld der beschriebenen Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens hat sich als sinnvoll herausgestellt, damit diese Störungen nicht zu falschen Ergebnissen hinsichtlich eines Reifendruckverlusts führen.

Folgende Typen von systematischen Störungen müssen aus dem Spektrum eliminiert werden:

1. radumdrehungssynchron anfallende Störungen, wie z. B. der Polteilungsfehler des Encoders zur Messung der Radgeschwindigkeit, allgemeine Reifen- und Felgenungleichförmigkeiten oder auch Einbautoleranzen
2. Störungen aufgrund von Vibrationen im Antriebsstrang, die nur an den angetriebenen Rädern auftreten
3. Störungen aufgrund von monofrequenten Anregungen der Straße

Zur Eliminierung dieser Störungen wird zunächst die Störfrequenz identifiziert und dann im Spektrum die zu dieser Frequenz gehörige Amplitude z. B. durch den Mittelwert der Amplituden der Nachbarkfrequenzen ersetzt. Es empfiehlt sich dabei auch höhere Ordnungen dieser Störfrequenzen zu eliminieren. Störfrequenzen des Motors zeigen sich beispielsweise abhängig von der Bauart des Motors bei ganzzahligen Vielfachen der Motorgrundfrequenz sowie z. T. auch bei ganzzahligen Vielfachen der halben Motorgrundfrequenz.

Zur Identifikation der verschiedenen systematischen Störfrequenzen werden folgende Verfahren angewendet:

Zu (1): Störfrequenzen sind die Raddrehfrequenz und ihre ganzzahligen Vielfachen im relevanten Frequenzbereich.

Zu (2): - Störfrequenz ist die Motordrehfrequenz, berechnet aus der Motordrehzahl vom Fahrzeugdatenbus, z. B. CAN, sowie ganzzahlige Vielfache der Motordrehfrequenz und der halben Motordrehfrequenz. Liegt die Information über den Motortyp z. B. auch auf dem Fahrzeugdatenbus oder kann dieser aus dort vorliegenden Informationen abgeleitet werden, so empfiehlt es sich, nur die für den jeweiligen Motortyp relevanten Ordnungen zu eliminieren

- Getriebedrehfrequenzen, berechnet aus der Raddrehzahl (ggf. auch der Motordrehzahl) und den Übersetzungsverhältnissen/Zähnezahlen

Zu (3): Störfrequenzen, die von der Straße angeregt werden, sind am Vorder- und Hinterrad der gleichen Fahrzeugseite erkennbar. Durch einen Vergleich der Spektren von Vorder- und Hinterrad für zeitgleich ermittelte Signale können diese identifiziert werden.

Ergebnis dieses Verfahrensschritts ist ein um die systematischen Störungen bereinigtes ungefiltertes Frequenzspektrum z. B. in Form der spektralen Leistungsdichte.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass es erheblich einfacher ist, diese systematischen Störungen im Frequenzbereich zu eliminieren als bereits schon im Zeitbereich.

Zur Eliminierung von stochastischen Störungen werden die Spektren über einen längeren Zeitraum gemittelt bzw. es wird ein gefiltertes Frequenzspektrum berechnet. Hierbei werden an ein einzelnes ungefiltertes Spektrum bestimmte Güteanforderungen gestellt, z. B. Mindestenergieinhalt (da Eigenschwingung auf sehr glatten Straßen kaum ausgeprägt ist), Ausgeprägtheit des Peaks, etc.

Für den Fall, dass diese Anforderungen nicht erfüllt sind, wird dieses Spektrum nicht für die Berechnung des mittleren bzw. gefilterten Spektrums herangezogen.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
 - a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
 - b) Ermitteln und Speichern der Gradienten $\alpha_{1\text{soll}}$, $\alpha_{2\text{soll}}$ der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
 - c) Bilden des Verhältnisses α_{soll} aus den Gradienten $\alpha_{1\text{soll}}$ und $\alpha_{2\text{soll}}$,
 - d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
 - e) kontinuierliches Ermitteln der Gradienten $\alpha_{1\text{ist}}$, $\alpha_{2\text{ist}}$ der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
 - f) Bilden des Verhältnisses α_{ist} aus den Gradienten $\alpha_{1\text{ist}}$ und $\alpha_{2\text{ist}}$,
 - g) kontinuierliches Vergleichen der Verhältnisse α_{ist} und α_{soll} miteinander,
 - h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von α_{ist} zu α_{soll} einen definierten Wert überschreitet.

2. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
 - b) Ermitteln der xdB-, insbesondere 3 dB-Grenzfrequenz f_{G1soll} , f_{G2soll} der Maxima,
 - c) Bilden und Speichern der Differenzfrequenz Δf_{Gsoll} aus der oberen xdB-Grenzfrequenz f_{G2soll} und der unteren xdB-Grenzfrequenz f_{G1soll} ,
 - d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
 - e) kontinuierliches Ermitteln der xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen f_{G1st} , f_{G2st} der Maxima im Fahrbetrieb,
 - f) Bilden der Differenzfrequenz Δf_{G1st} aus der oberen xdB-Grenzfrequenz f_{G2st} und der unteren xdB-Grenzfrequenz f_{G1st} ,
 - g) kontinuierliches Vergleichen der Differenzfrequenzen Δf_{Gsoll} und Δf_{G1st} miteinander,
 - h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von Δf_{G1st} zu Δf_{Gsoll} einen definierten Wert überschreitet.

3. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
- a) Ermittlung und Aufzeichnung der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
 - b) Ermitteln und Speichern des maximalen Amplitudenwertes a_{soll} bei Soll-Druck des Reifens,
 - c) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
 - d) kontinuierliches Ermitteln des maximalen Amplitudenwertes a_{ist} ,
 - e) kontinuierliches Vergleichen der maximalen Amplitudenwerte a_{soll} und a_{ist} miteinander,
 - f) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von a_{ist} zu a_{soll} einen definierten Wert überschreitet.
4. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Resonanzfrequenz beobachtet wird, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
- a) Ermitteln und Aufzeichnen des Frequenzspektrums des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck und

Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz,

- b) Transformieren der das Schwingungsverhalten des Rades beschreibenden Differentialgleichungen

$$\begin{aligned} J_F \ddot{\phi} &= (\phi - \varphi) c_s + (\dot{\phi} - \dot{\varphi}) d_s \\ J_R \ddot{\phi} &= -(\phi - \varphi) c_s - (\dot{\phi} - \dot{\varphi}) d_s + F_t r \end{aligned}$$

mittels Laplace- oder Fouriertransformation,

- c) Auswählen eines Bereichs Δf_{soll} um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz f_{soll} herum,
- d) Korrelieren des ausgewählten Bereichs Δf_{soll} mit den transformierten Differentialgleichungen,
- e) Berechnen der Rotationssteifigkeit $c_{s,\text{soll}}$ und der Rotationsdämpfung $d_{s,\text{soll}}$,
- f) kontinuierliches Ermitteln des Frequenzspektrums des Rades im Fahrbetrieb und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz f_{ist} ,
- g) Auswählen eines Bereichs Δf_{ist} um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz f_{ist} herum,
- h) Korrelieren des ausgewählten Bereichs Δf_{ist} der ermittelten Resonanzfrequenz f_{ist} mit den transformierten Differentialgleichungen zur Bestimmung der Rotationssteifigkeit $c_{s,\text{ist}}$ und der Rotationsdämpfung $d_{s,\text{ist}}$,
- i) Bilden der Differenz von $c_{s,\text{soll}}$ und $c_{s,\text{ist}}$ und der Differenz von $d_{s,\text{soll}}$ und $d_{s,\text{ist}}$ und Erzeugen eines

Signals, wenn mindestens eine der Differenzen einen definierten Wert überschreitet.

5. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingungsverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Resonanzfrequenz beobachtet wird, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
 - a) Ermitteln des Reifeninnendrucks $p_{soll}(c_s, s_{oll}, d_s, s_{oll})$ im Sollzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
 - b) Ermitteln des Reifeninnendrucks $p_{ist}(c_s, i_{st}, d_s, i_{st})$ im Istzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
 - c) Bilden der Differenz von p_{soll} und p_{ist} und Erzeugen eines Signals, wenn die Differenz einen definierten Wert überschreitet.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Signal erst erzeugt wird, wenn die Abweichung den definierten Wert über einen festgelegten Zeitraum überschreitet.
7. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gradienten α_{1soll} , α_{2soll} unterhalb und oberhalb der Resonanz bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp

extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert werden.

8. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die xdB-Grenzfrequenzen f_{G1soll} , f_{G2soll} der Maxima bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert werden.
9. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der maximale Amplitudenwert a_{soll} bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert wird.
10. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Korrelation der transformierten Differentialgleichungen mit der transformierten Eigenfrequenzkurve f_{soll} zur Ermittlung des Reifeninnendrucks p_{soll} oder der Rotationssteifigkeit c_s und der Rotationsdämpfung d_s für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Speichermedium ein Transponder ist.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Speichermedium ein Barcode ist.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb durch die Last, die Temperatur, die Feuchtigkeit, den Umgebungsluftdruck und/oder die Fahr-

zeugbeschleunigung hervorgerufene Fremdeinflüsse kompensiert werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb die Profiltiefe des Reifens berücksichtigt wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit Hilfe eines Initialisierungsmittels am fahrenden Kraftfahrzeug eine von der Kraftfahrzeuggeschwindigkeit abhängige Kalibrierung durchgeführt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Umrechnung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich über Tabellen erfolgt.
17. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass über die Lage der maximalen Amplitudenwerte a_{1st} die Reifendimension erkannt wird.
18. Verfahren nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Kopplung mit einem indirekten System zur Erkennung des Mindestluftdrucks.
19. Verwendung mindestens eines der Verfahren 1 bis 5 in einem direkten und/oder indirekten Reifendrucküberwachungssystem.

1/5

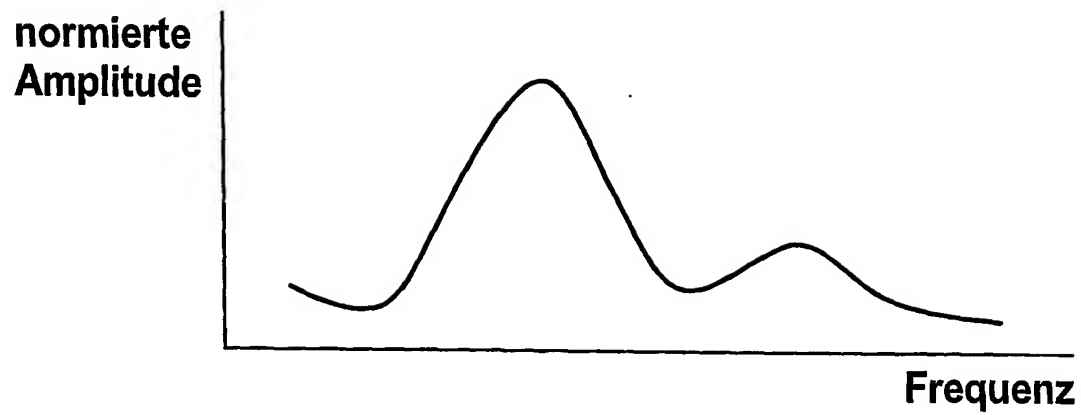


Fig. 1

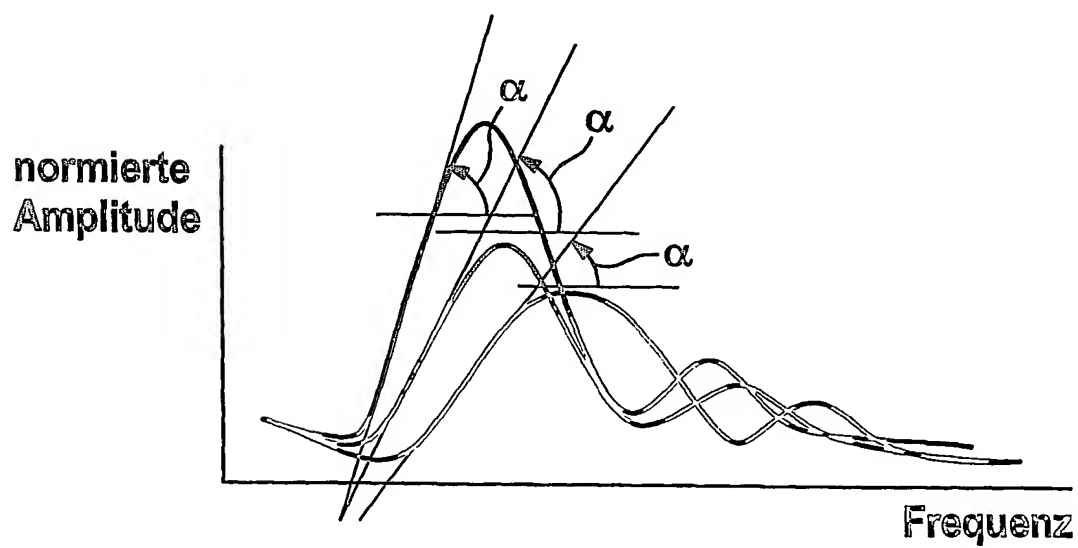
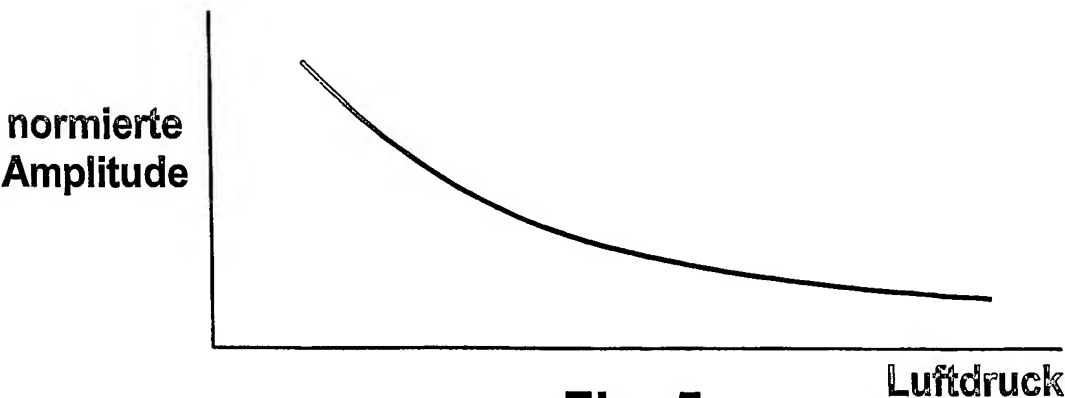
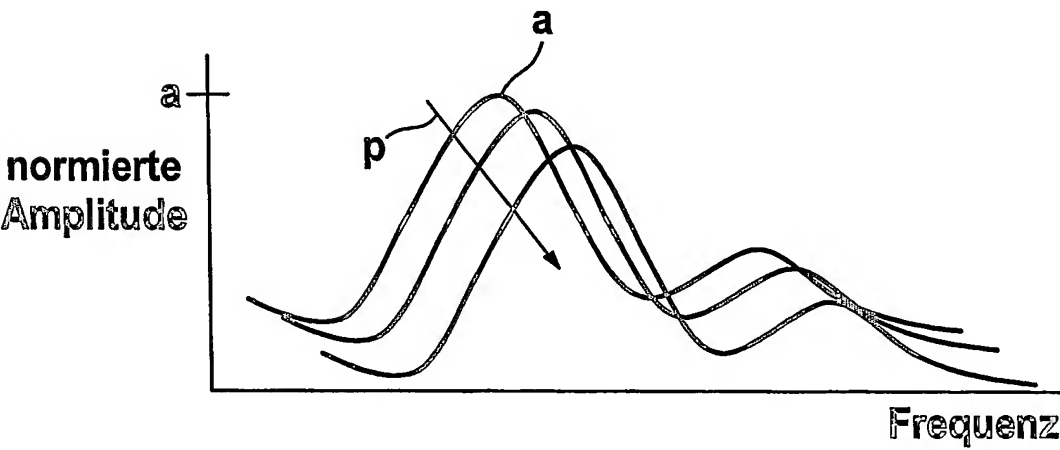
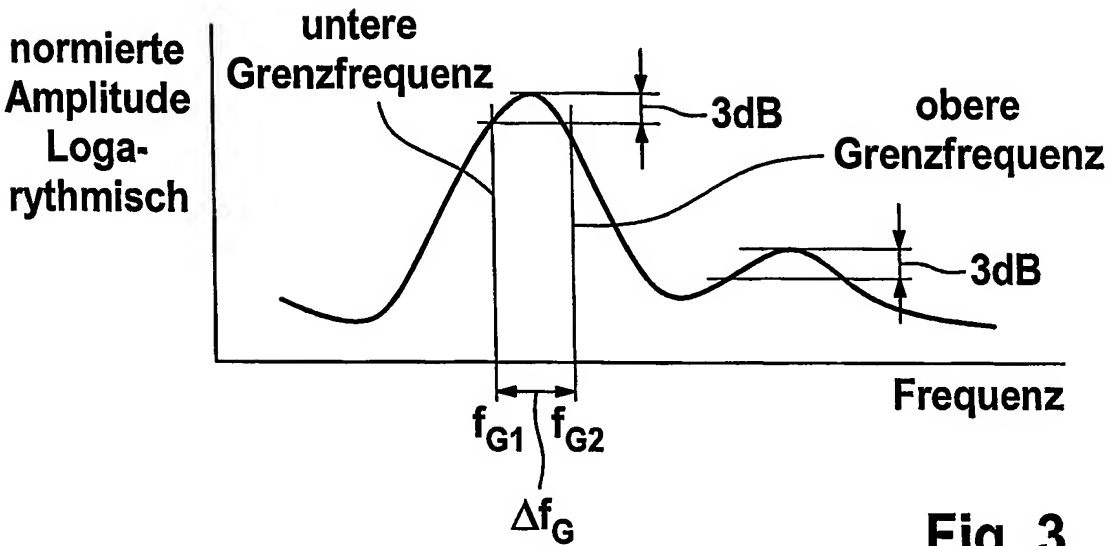


Fig. 2



3/5

Fig. 6

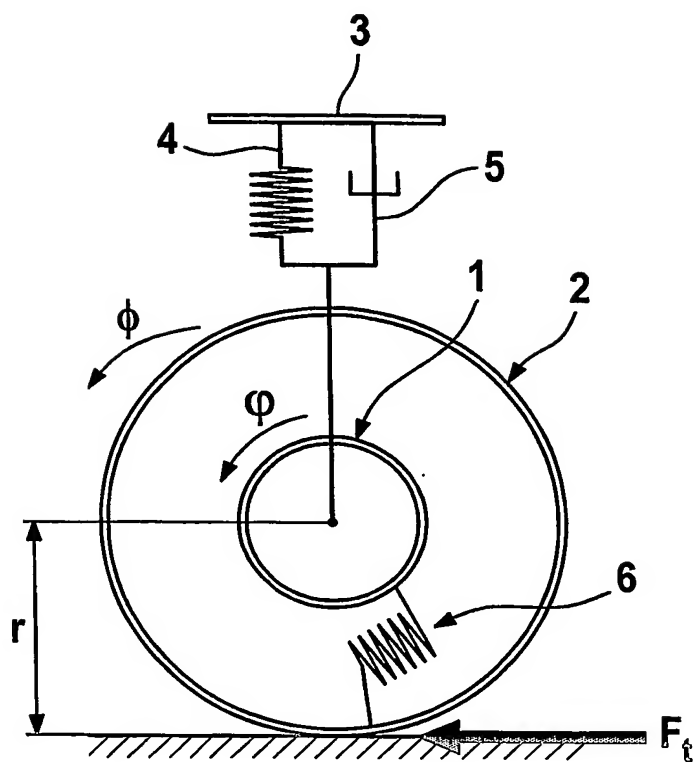
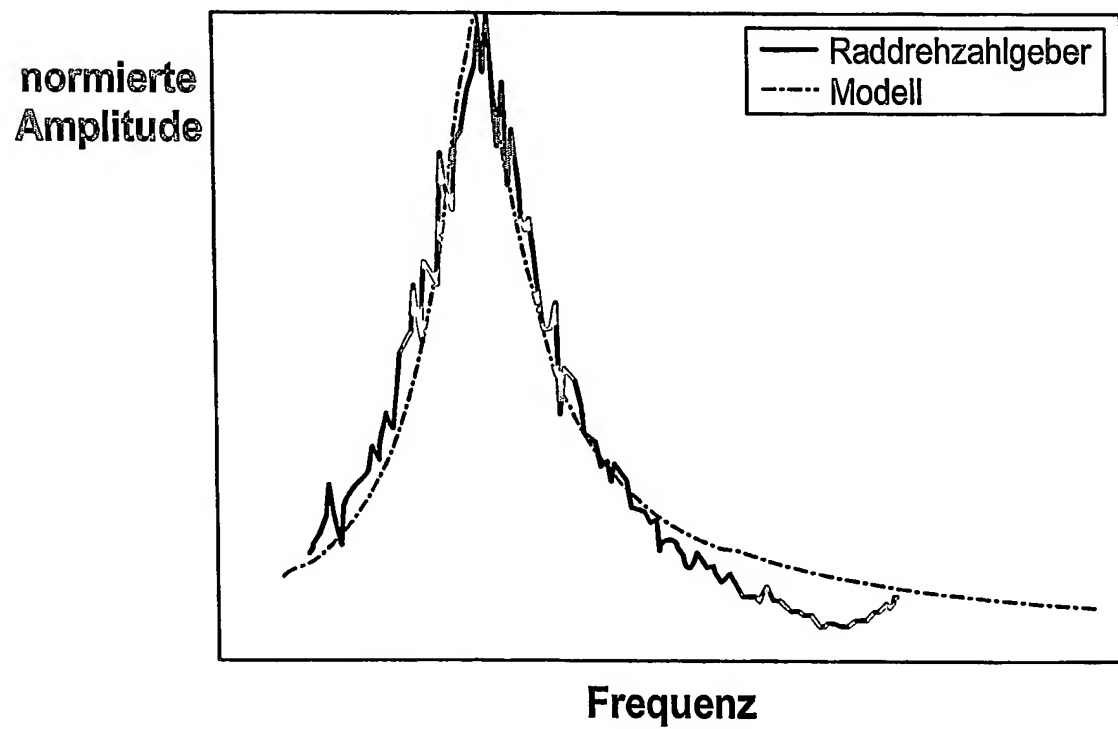
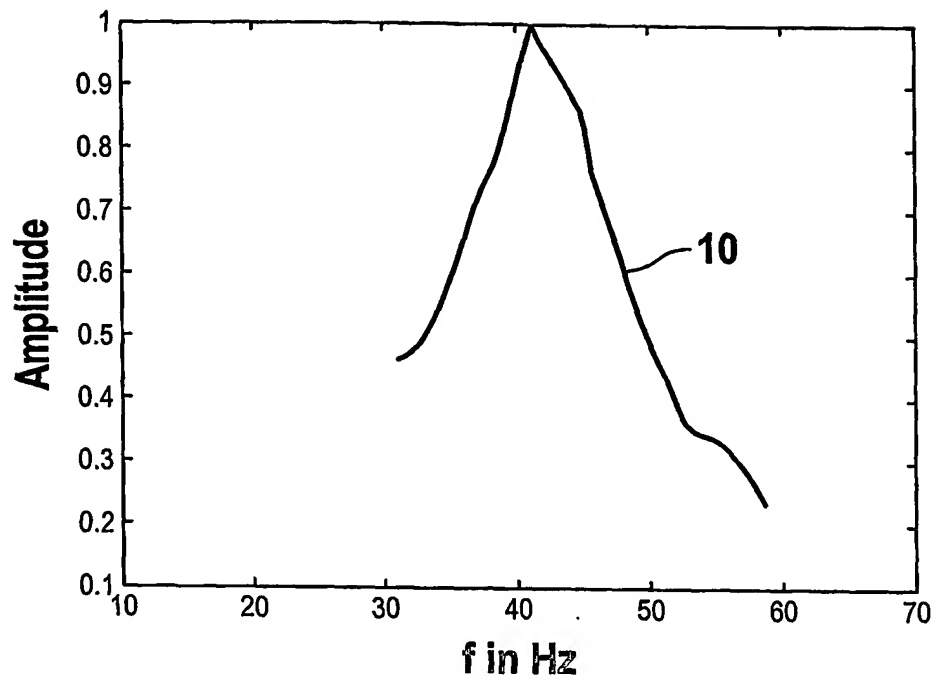
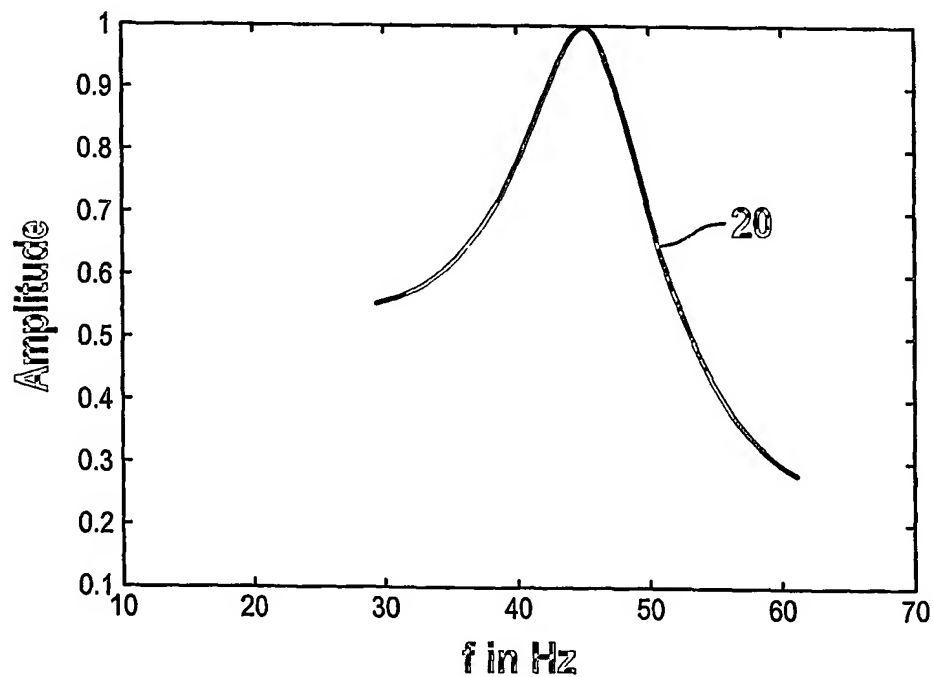


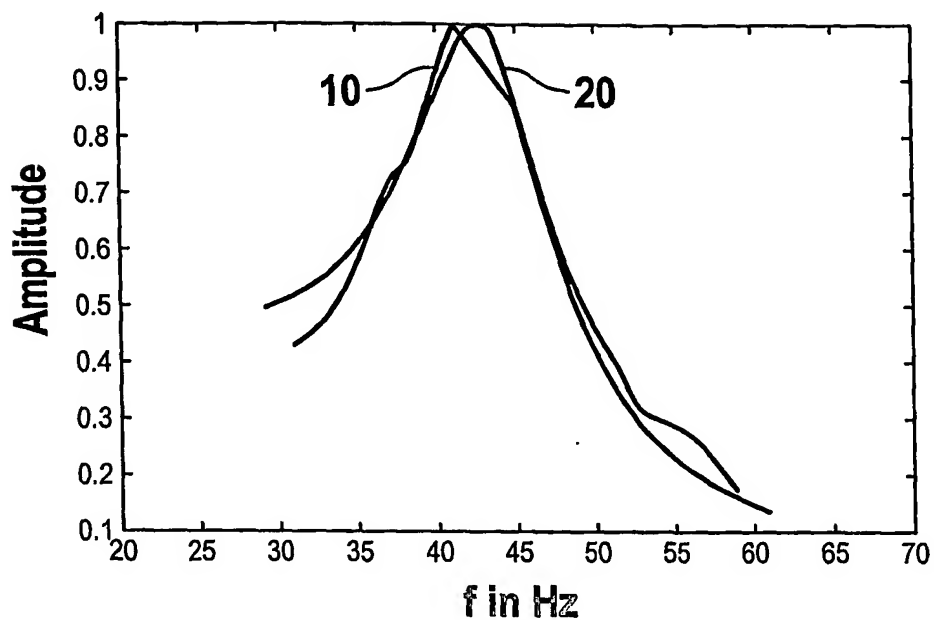
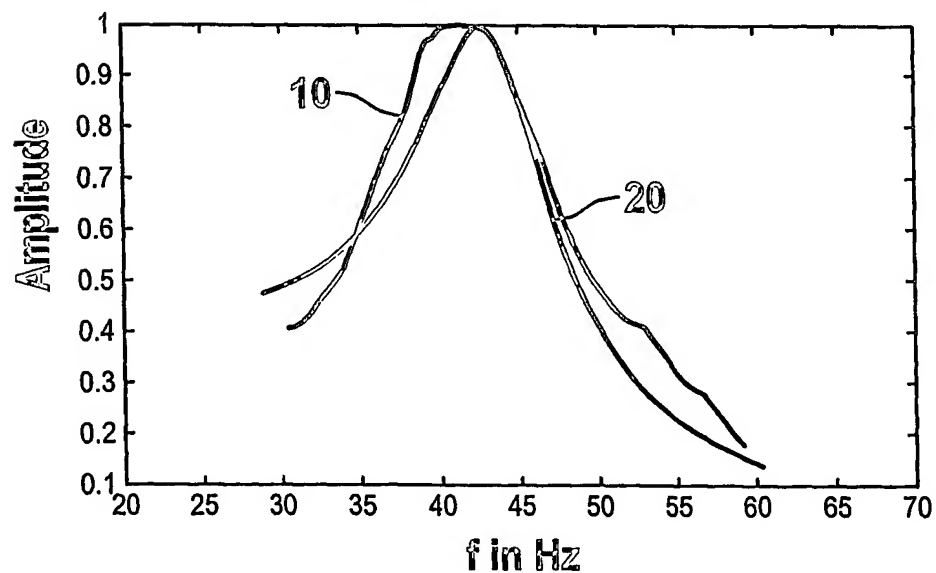
Fig. 7



4/5

Fig. 8a**Fig. 8b**

5/5

Fig. 9**Fig. 10**

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 B60C23/06 B60C23/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 B60C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0 699 546 A (TOYOTA MOTOR CO LTD ; TOYODA CHUO KENKYUSHO KK (JP)) 6 March 1996 (1996-03-06) page 38, lines 31-36 page 34, lines 33-43 page 37, lines 20-29 figures 47-52	5
A	US 5 553 491 A (NAITO TOSHIHARU ET AL) 10 September 1996 (1996-09-10) column 8, lines 17-62; figures 10,90-92	2
A	DE 101 57 885 A (TOYOTA MOTOR CO LTD ; AISIN SEIKI (JP); DENSO CORP (JP)) 2 October 2002 (2002-10-02) paragraph '150071!; figures 5a,5b	1,2
	----- -/-- -----	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the International filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- * & * document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 October 2004

Date of mailing of the international search report

23/11/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Peschel, W

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 891 904 A (TOYODA CHUO KENKYUSHO KK) 20 January 1999 (1999-01-20) page 3, lines 25-48 page 15, line 1 - page 16, line 14 -----	4,5
A	DE 40 09 540 A (TEVES GMBH ALFRED) 26 September 1991 (1991-09-26) column 3, lines 34-56 -----	4,5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

EP2004/051403

Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 1 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 2 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

see supplemental sheet

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

The International Searching Authority has determined that this international application contains multiple (groups of) inventions, namely

1. Claim 1

method of determining internal pressure by analysis of the vibrational behavior of the tire, the gradient of the frequency curve above and below the resonance frequency being used to determine underinflation.

2. Claim 2

method of determining internal pressure by analysis of the vibrational behavior of the tire, a 3 dB bandwidth of the frequency curve in the region of the resonance frequency being used to determine underinflation.

3. Claim 3

method of determining internal pressure by analysis of the vibrational behavior of the tire, the maximum amplitude of the resonance frequency being used to determine underinflation.

4. Claim 4

method of determining internal pressure by analysis of the vibrational behavior of the tire, rotational rigidity values derived by Laplace transformation and rotational damping of the tire model being used to determine underinflation.

5. Claim 5

method of determining internal pressure by analysis of the vibrational behavior of the tire, characteristic curves for rotational rigidity and rotational damping being used to determine underinflation.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/051403

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0699546	A	06-03-1996	JP 2899741 B2	02-06-1999
			JP 7329526 A	19-12-1995
			JP 2984546 B2	29-11-1999
			JP 8015069 A	19-01-1996
			DE 69500690 D1	16-10-1997
			DE 69500690 T2	05-03-1998
			EP 0699546 A1	06-03-1996
			US 6142026 A	07-11-2000
US 5553491	A	10-09-1996	JP 2836652 B2	14-12-1998
			JP 5133831 A	28-05-1993
			JP 3137138 B2	19-02-2001
			JP 5213018 A	24-08-1993
			JP 3147472 B2	19-03-2001
			JP 5221208 A	31-08-1993
			JP 3055293 B2	26-06-2000
			JP 5254316 A	05-10-1993
			JP 3063386 B2	12-07-2000
			JP 5294118 A	09-11-1993
			JP 3343937 B2	11-11-2002
			JP 5294119 A	09-11-1993
			JP 3289312 B2	04-06-2002
			JP 5294120 A	09-11-1993
			JP 3136772 B2	19-02-2001
			JP 5330322 A	14-12-1993
			JP 3136801 B2	19-02-2001
			JP 6115328 A	26-04-1994
			JP 3391482 B2	31-03-2003
			JP 6122304 A	06-05-1994
			JP 3391486 B2	31-03-2003
			JP 6183231 A	05-07-1994
			US 5497657 A	12-03-1996
			DE 69226175 D1	13-08-1998
			DE 69226175 T2	18-03-1999
			DE 69233018 D1	22-05-2003
			DE 69233018 T2	22-01-2004
			EP 0578826 A1	19-01-1994
			EP 0783982 A1	16-07-1997
			WO 9310431 A1	27-05-1993
			JP 3289382 B2	04-06-2002
			JP 6328919 A	29-11-1994
DE 10157885	A	02-10-2002	JP 2002160512 A	04-06-2002
			CA 2363917 A1	27-05-2002
			DE 10157885 A1	02-10-2002
			US 2002095264 A1	18-07-2002
EP 0891904	A	20-01-1999	DE 69804723 D1	16-05-2002
			DE 69804723 T2	21-11-2002
			EP 0891904 A2	20-01-1999
			JP 11078843 A	23-03-1999
			US 6264292 B1	24-07-2001
DE 4009540	A	26-09-1991	DE 4009540 A1	26-09-1991
			WO 9114586 A1	03-10-1991

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 B60C23/06 B60C23/00

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 B60C

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 0 699 546 A (TOYOTA MOTOR CO LTD ; TOYODA CHUO KENKYUSHO KK (JP)) 6. März 1996 (1996-03-06) Seite 38, Zeilen 31-36 Seite 34, Zeilen 33-43 Seite 37, Zeilen 20-29 Abbildungen 47-52	5
A	US 5 553 491 A (NAITO TOSHIHARU ET AL) 10. September 1996 (1996-09-10) Spalte 8, Zeilen 17-62; Abbildungen 10,90-92	2
A	DE 101 57 885 A (TOYOTA MOTOR CO LTD ; AISIN SEIKI (JP); DENSO CORP (JP)) 2. Oktober 2002 (2002-10-02) Absatz '150071!; Abbildungen 5a,5b	1,2
	----- -/-- -----	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

G Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

28. Oktober 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

23/11/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Peschel, W

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Beitr. Anspruch Nr.
A	EP 0 891 904 A (TOYODA CHUO KENKYUSHO KK) 20. Januar 1999 (1999-01-20) Seite 3, Zeilen 25-48 Seite 15, Zeile 1 - Seite 16, Zeile 14 -----	4,5
A	DE 40 09 540 A (TEVES GMBH ALFRED) 26. September 1991 (1991-09-26) Spalte 3, Zeilen 34-56 -----	4,5

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/051403

Feld II Bemerkungen zu den Ansprüchen, die sich als nicht recherchierbar erwiesen haben (Fortsetzung von Punkt 2 auf Blatt 1)

Gemäß Artikel 17(2)a) wurde aus folgenden Gründen für bestimmte Ansprüche kein Recherchenbericht erstellt:

1. ☐ Ansprüche Nr.
weil sie sich auf Gegenstände beziehen, zu deren Recherche die Behörde nicht verpflichtet ist, nämlich
2. ☐ Ansprüche Nr.
weil sie sich auf Teile der internationalen Anmeldung beziehen, die den vorgeschriebenen Anforderungen so wenig entsprechen, daß eine sinnvolle internationale Recherche nicht durchgeführt werden kann, nämlich
3. ☐ Ansprüche Nr.
weil es sich dabei um abhängige Ansprüche handelt, die nicht entsprechend Satz 2 und 3 der Regel 6.4 a) abgefaßt sind.

Feld III Bemerkungen bei mangelnder Einheitlichkeit der Erfindung (Fortsetzung von Punkt 3 auf Blatt 1)

Die internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, daß diese internationale Anmeldung mehrere Erfindungen enthält:

siehe Zusatzblatt

1. ☐ Da der Anmelder alle erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht auf alle recherchierbaren Ansprüche.
2. ☒ Da für alle recherchierbaren Ansprüche die Recherche ohne einen Arbeitsaufwand durchgeführt werden konnte, der eine zusätzliche Recherchegebühr gerechtfertigt hätte, hat die Behörde nicht zur Zahlung einer solchen Gebühr aufgefordert.
3. ☐ Da der Anmelder nur einige der erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht nur auf die Ansprüche, für die Gebühren entrichtet worden sind, nämlich auf die Ansprüche Nr.
4. ☐ Der Anmelder hat die erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren nicht rechtzeitig entrichtet. Der internationale Recherchenbericht beschränkt sich daher auf die in den Ansprüchen zuerst erwähnte Erfindung; diese ist in folgenden Ansprüchen erfaßt:

Bemerkungen hinsichtlich eines Widerspruchs

- ☐ Die zusätzlichen Gebühren wurden vom Anmelder unter Widerspruch gezahlt.
- ☐ Die Zahlung zusätzlicher Recherchegebühren erfolgte ohne Widerspruch.

Die internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, dass diese internationale Anmeldung mehrere (Gruppen von) Erfindungen enthält, nämlich:

1. Anspruch: 1

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks durch Analyse des Schwingungsverhaltens des Reifens wobei zur Minderdruckermittlung der Gradient der Frequenzkurve unter- und oberhalb der Resonanzfrequenz herangezogen wird.

2. Anspruch: 2

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks durch Analyse des Schwingungsverhaltens des Reifens wobei zur Minderdruckermittlung eine 3dB Bandbreite der Frequenzkurve im Bereich der Resonanzfrequenz herangezogen wird.

3. Anspruch: 3

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks durch Analyse des Schwingungsverhaltens des Reifens wobei zur Minderdruckermittlung das Amplitudenmaximum der Resonanzfrequenz herangezogen wird.

4. Anspruch: 4

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks durch Analyse des Schwingungsverhaltens des Reifens wobei zur Minderdruckermittlung die mittels Laplace-Transformation ermittelten Werte der Rotationssteifigkeit und der Rotationsdämpfung des Reifenmodells herangezogen werden.

5. Anspruch: 5

Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks durch Analyse des Schwingungsverhaltens des Reifens wobei zur Minderdruckermittlung Rotationssteifigkeits- und Rotationsdämpfungs-Kennfelder herangezogen werden.

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichung

n, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/051403

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0699546	A	06-03-1996	JP 2899741 B2	02-06-1999
			JP 7329526 A	19-12-1995
			JP 2984546 B2	29-11-1999
			JP 8015069 A	19-01-1996
			DE 69500690 D1	16-10-1997
			DE 69500690 T2	05-03-1998
			EP 0699546 A1	06-03-1996
			US 6142026 A	07-11-2000
US 5553491	A	10-09-1996	JP 2836652 B2	14-12-1998
			JP 5133831 A	28-05-1993
			JP 3137138 B2	19-02-2001
			JP 5213018 A	24-08-1993
			JP 3147472 B2	19-03-2001
			JP 5221208 A	31-08-1993
			JP 3055293 B2	26-06-2000
			JP 5254316 A	05-10-1993
			JP 3063386 B2	12-07-2000
			JP 5294118 A	09-11-1993
			JP 3343937 B2	11-11-2002
			JP 5294119 A	09-11-1993
			JP 3289312 B2	04-06-2002
			JP 5294120 A	09-11-1993
			JP 3136772 B2	19-02-2001
			JP 5330322 A	14-12-1993
			JP 3136801 B2	19-02-2001
			JP 6115328 A	26-04-1994
			JP 3391482 B2	31-03-2003
			JP 6122304 A	06-05-1994
			JP 3391486 B2	31-03-2003
			JP 6183231 A	05-07-1994
			US 5497657 A	12-03-1996
			DE 69226175 D1	13-08-1998
			DE 69226175 T2	18-03-1999
			DE 69233018 D1	22-05-2003
			DE 69233018 T2	22-01-2004
			EP 0578826 A1	19-01-1994
			EP 0783982 A1	16-07-1997
			WO 9310431 A1	27-05-1993
			JP 3289382 B2	04-06-2002
			JP 6328919 A	29-11-1994
DE 10157885	A	02-10-2002	JP 2002160512 A	04-06-2002
			CA 2363917 A1	27-05-2002
			DE 10157885 A1	02-10-2002
			US 2002095264 A1	18-07-2002
EP 0891904	A	20-01-1999	DE 69804723 D1	16-05-2002
			DE 69804723 T2	21-11-2002
			EP 0891904 A2	20-01-1999
			JP 11078843 A	23-03-1999
			US 6264292 B1	24-07-2001
DE 4009540	A	26-09-1991	DE 4009540 A1	26-09-1991
			WO 9114586 A1	03-10-1991